

Este documento es una versión preprint de:

Algorri, J.F.; Urruchi, V.; Sánchez-Pena, J.M.; Bennis, N.; Geday, M.A. (2011) Respuesta electroóptica de microlentes de cristal líquido sintonizables (Electrooptic response in tunable liquid crystal microlenses). *VII Reunión española de optoelectrónica: OPTOEL2011: Santander, 29 junio - 1 julio de 2011*. [6 p.]

# Respuesta electroóptica de microlentes de cristal líquido sintonizables

## Electrooptic response in tunable liquid crystal microlenses

J.F. Algorri<sup>1</sup>, V. Urruchi<sup>1</sup>, J.M. Sánchez-Pena<sup>1</sup>, N. Bennis<sup>2</sup>, M.A. Geday<sup>2</sup>

1. Grupo de Displays & Aplicaciones Fotónicas, Dep. de Tecnología Electrónica, E.P.S., Universidad Carlos III, Butarque 15, 28911, Leganés, Madrid, Spain
2. Grupo de Cristales Líquidos, Dep. de Tecnología Fotónica, E.T.S.I. Telecomunicación, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, Spain

Persona de contacto: jalgorri@ing.uc3m.es

### RESUMEN

Se ha fabricado y caracterizado un *array* de microlentes cilíndricas sintonizables de cristal líquido (CL). Se ha diseñado un electrodo de control en forma de peine que, junto a una capa metálica de alta resistividad, crea un gradiente de tensión en el dispositivo. Este gradiente de tensión genera un índice de refracción gradual en el ancho de la lente cuando las lentes se controlan mediante un campo eléctrico de control externo de amplitud optimizada. Se han estudiado los retardos de fase generados por la distribución de campo en cada lente utilizando métodos interferométricos. Así mismo, se han realizado medidas de la distribución angular de la luminancia a través de la lenticula con instrumentación específica.

**Palabras clave:** Lente de cristal líquido, retardo de fase, distribución angular de luminancia, índice gradual, sintonizable por tensión, alta resistividad.

### ABSTRACT

One-dimensional array of cylindrical tunable liquid crystal (LC) lenses has been manufactured and characterized. A comb electrode has been designed as a control electrode on the top glass substrates that, in addition to a high resistance metallic layer, causes a voltage gradient inside the device. This voltage gradient generates a radial graded refractive index along each lens, as lenses are switched by applying amplitude optimized waveforms. Phase retardation profiles, generated by the radial electric field distribution on each lens, were measured by a convectional interferometric technique. Also, luminance angular distribution through the lenses has been measured with special equipments.

**Key words:** Liquid crystal lens, phase retardation, luminance angular distribution, graded index, electrically tunable, high resistivity.

## 1.- Introducción

En la actualidad, el diseño e implementación de dispositivos de cristal líquido sintonizables constituye un área muy activa de investigación con resultados prometedores. En este sentido, se han descrito en la literatura un abanico significativo de componentes y sistemas ópticos basados en tecnología de

cristal líquido [1]. Con la tecnología de cristal líquido se ha dado paso a dispositivos que, en ausencia de elementos mecánicos, emulan las características de la óptica a modelar, únicamente a través de la aplicación de un campo eléctrico externo. Un ejemplo de componente óptico modelados con tecnología de cristal líquido se encuentra en las lentes

convencionales. Las técnicas de fabricación de lentes con dicha tecnología se han descrito ampliamente durante las últimas tres décadas. Entre las aproximaciones al diseño de las lentes sintonizables, con control de la distancia focal, se encuentran las técnicas que utilizan cristal líquido en polímeros estabilizados (*polymer stabilization LC techniques* [2]), los esquemas que introducen patrones específicos para los electrodos (*patterned electrode schemes* [3]), los diseños de perfiles con relieve para el conductor transparente (*surface relief profiles* [4]) o las lentes modales. En este trabajo, se propone el diseño de nuevas lentes modales fabricadas con materiales que no se han utilizado con anterioridad para esta aplicación.

Las lentes dinámicas tienen aplicación en numerosos sistemas, para interconexión óptica, guiado de haces, elementos conformadores de frentes de onda, elementos ópticos correctores en gafas o incluso en sistemas de visión autoestereoscópica [5]. Sus cualidades más atractivas se derivan de su reducido peso y tamaño, así como del uso de tensiones de control reducidas y bajo consumo. Como contrapartida, poseen tiempos de respuesta (del orden de ms para cristales líquidos nemáticos) que pueden resultar excesivos en aplicaciones que demandan velocidad.

## 2.- Retardo de fase en lentes modales

El funcionamiento de una lente modal consiste en la generación de un gradiente de índice de refracción en la dirección radial de la lente que reproduce la curvatura con que se fabrica una lente convencional. Para ello se ha empleado tradicionalmente un electrodo de alta resistividad, que funciona como electrodo de control. Esta técnica de control modal fue utilizada por primera vez en la década de los 90 por A.F. Naumov et. al [6]. La estructura típica de una lente modal consiste en: un electrodo de baja resistividad (funcionando como contraelectrodo) / una capa de cristal líquido / una capa de material de alta resistividad / un electrodo de control conectado a la tensión de excitación. El patrón de la máscara del electrodo de control se realizará acorde al tipo de lente: esférica, cilíndrica, etc. La capa de alta resistividad se puede modelar eléctricamente como una

línea de transmisión que, al conectarse a la capa de cristal líquido (equivalente al paralelo de una resistencia con un condensador), da lugar a un gradiente de campo eléctrico uniforme desde el centro al borde de la lente. Este gradiente se traducirá en un perfil complementario para el retardo de fase de la lente (Fig. 1).

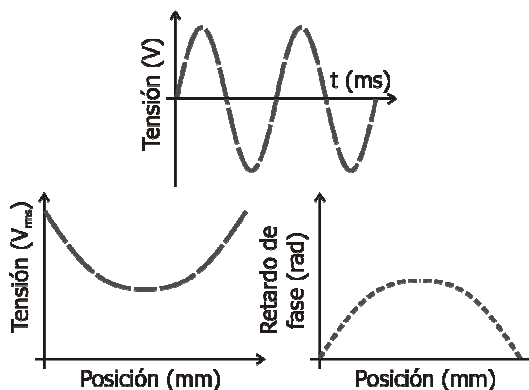


Fig. 1: Perfil de la tensión y del retardo de fase en una lente modal en función de la distancia al centro de la misma.

Se toman como referencia valores de la resistencia por cuadro para los materiales candidatos comprendidos en el rango  $100\text{k}\Omega/\square$  -  $1\text{M}\Omega/\square$ . Así mismo, serán deseables estructuras de capas con estabilidad y repetitividad en los procesos de fabricación.

## 3.- Diseño de la lentícula

La propuesta de diseño consiste en un *array* de lentes cilíndricas de anchura (diámetro) micrométrica por lo que, en adelante, se la denominará lentícula.

### 3.1.- Electrodo de alta resistividad

Se han propuesto en la literatura diferentes materiales que producen un perfil de tensión apropiado; un ejemplo es el PEDOT. En este trabajo se ha planteado, por primera vez, el uso de materiales metálicos para la capa de alta resistividad. Se ha demostrado que la resistividad, propiedad intrínseca de los metales, experimenta un crecimiento no lineal a medida que disminuye el espesor de la capa del material considerado. Este efecto se ha descrito para espesores de capa por debajo de 100 Angstroms (10nm) [7].

Para el diseño de la lentícula se ha elegido el níquel por su bajo coste y sencillez de laminado mediante deposición por evaporación.

La resistividad del níquel se incrementa de forma exponencial para espesores próximos a 70 Angstroms y se obtienen resistencias por cuadro del orden de magnitud descrito con anterioridad ( $M\Omega/\square$ ).

### 3.2.- Máscara del electrodo de control

El electrodo de control para una única lente cilíndrica estaría formado únicamente por dos electrodos a modo de columnas que se direccionasen con el mismo potencial. Al tratarse de un *array* de lentes cilíndricas, la máscara del electrodo de control ha consistido en un electrodo con forma de peine (Fig. 2).

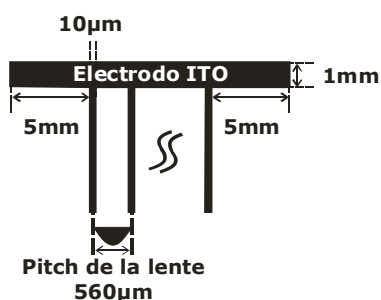


Fig. 2: Patrón de la máscara con forma de peine para el electrodo de control.

Para definir las dimensiones de la máscara, se ha tomado como criterio de diseño la obtención de una lenticula de distancia focal 3mm. Con ello se proyecta un objetivo doble: controlar la capacidad de enfoque de la lente a corta distancia y, complementariamente, su potencia para desviar los haces a larga distancia (decenas de centímetros). Ya que cada lente de la lenticula se puede modelar como una lente de índice gradual, se ha empleado la expresión que determina la distancia focal en éstas como punto de partida para obtener el radio de cada lente,

$$f_{GRIN} = \frac{r^2}{2 \cdot d \cdot (n_{max} - n(r))} \quad (1)$$

donde  $r$  es el radio de cada lente (mitad del diámetro de la misma),  $d = 50 \text{ m}$  es el espesor de la capa de CL y  $n_{max} - n(r)$  es la diferencia entre el índice de refracción máximo ( $n_{max}$ , en el eje óptico de cada lente) y el índice de refracción en la posición  $r$  ( $n(r)$ , considerado en el borde de cada lente).

Al tratarse de muestras con alineamiento homogéneo de las moléculas respecto a la

superficie de los vidrios, y estar presente el gradiente de tensión inducido por construcción en el dispositivo, se puede identificar  $n_{max}$  con el índice de refracción extraordinario del CL y  $n(r)$  con su índice de refracción ordinario. El CL nemático utilizado ha sido el MDA-98-1602 ( $\Delta n = 0.2666$ ) de Merck, con  $n_e = 1.7779$  y  $n_o = 1.5113$ . Con los datos previos se ha diseñado el diámetro teórico de cada lente de valor  $560 \text{ m}$ .

## 4.- Sistemas de caracterización

Para el estudio de la respuesta electroóptica de la lenticula previamente definida, se han planteado dos sistemas de caracterización. El objetivo, en primer lugar, es el análisis de la respuesta individual de cada lente de la lenticula analizando su perfil de retardo de fase. El efecto óptico de la lenticula conjunta se ha medido a partir de la distribución angular de la luz que pasa a su través.

### 4.1.- Caracterización del retardo de fase

La respuesta individual de cada lente se ha medido seleccionando y aislando una única sobre la superficie de la lenticula. El retardo de fase se mide mediante el método de interferencia convencional cuyo montaje experimental se muestra en la Fig. 3.

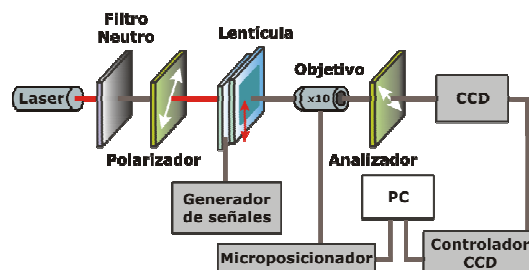


Fig. 3: Montaje experimental para la caracterización electroóptica del retardo de fase introducido por cada lente.

Como fuente de luz se utilizó un láser He-Ne polarizado a  $\lambda = 632,8\text{nm}$ . La lenticula se colocó entre polarizadores cruzados, con su dirección de alineamiento a  $45^\circ$  del polarizador de entrada para obtener la respuesta más brillante. Se utilizó un objetivo  $\times 10$  y un microposicionador controlado a través de un PC. Finalmente, la captura de las franjas de interferencia se realizó con una cámara CCD conectada a un circuito controlador y al PC. La lenticula se excitó con señales cuadradas procedentes de un generador: entre capturas

la frecuencia de la señal permaneció constante y se varió la amplitud.

La imagen que reproduce la CCD describe un patrón de franjas de interferencia con niveles claros y oscuros en el intervalo comprendido entre los dos electrodos de cada lente. Para cada posición  $r$  (respecto del centro de la lente), existe un retardo de fase local,  $\phi(r)$ , similar al originado por un retardador de media onda con birrefringencia efectiva  $\Delta n_{\text{eff}}(r)$ , en dicha posición. De este modo, el gradiente de tensión generado por la capa de alta resistividad, se traduce en un gradiente de birrefringencia efectiva: desde un valor máximo en el centro de cada lente, hasta un valor mínimo en los bordes, pasando por franjas consecutivas con diferencias de fase de valor 2. Para la obtención del perfil de franjas de interferencia se ha desarrollado un programa por ordenador para el tratamiento de las imágenes capturadas por la CCD que permite extraer el perfil de retardo de fase.

#### 4.2.- Caracterización angular

La caracterización angular de la luminancia a la salida de la lenticula se ha realizado mediante el medidor VCMaster3D de ELDIM. Para ello, se ha implementado un montaje experimental sencillo como se muestra en la Fig. 4.

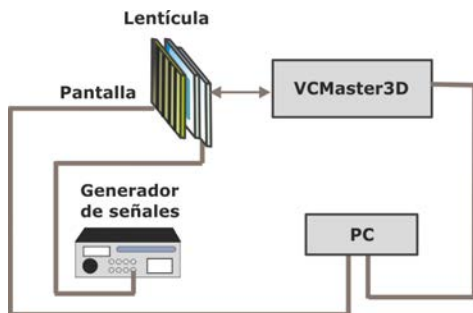


Fig. 4: Montaje experimental para la caracterización angular de la luminancia.

Se ha utilizado una pantalla como iluminación trasera que actúa como una lámpara de emisión uniforme tras la lenticula. La pantalla se ha escogido con una resolución tal que el *pitch* de la lenticula doble al *pitch* de la pantalla y cada lente se alinea frente a dos columnas de píxeles de la pantalla. Con esta disposición, y con el objeto de medir la desviación de la luz de la pantalla, el motivo más sencillo mostrado en la pantalla está

formado por columnas alternas de píxeles encendidos. Por otra parte, se han tenido en cuenta las especificaciones del medidor angular para el correcto posicionamiento de la muestra: perpendicular a la horizontal y a una distancia de enfoque de 1,5 cm. El equipo VCMaster3D caracteriza un spot sobre la muestra de medida. Para dicho spot mide la luminancia ( $\text{cd/m}^2$ ) que vería un observador desde una posición angular determinada (Fig. 5).

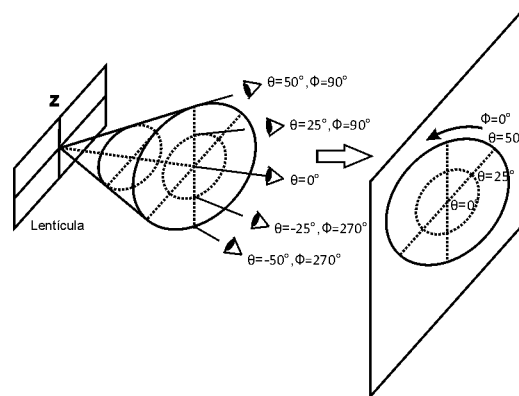


Fig. 5: Posición del observador respecto de la muestra y sistema de referencia de la luminancia en coordenadas polares.

El punto de observación en coordenadas polares se define mediante el ángulo acimutal ( $\Phi$ , entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ ) y el ángulo de inclinación respecto de la normal al dispositivo ( $\theta$ , entre  $0^\circ$  y  $50^\circ$ ). Tras la captura y procesamiento de imágenes el equipo muestra el resultado de la distribución angular de la luminancia en coordenadas polares utilizando un programa dedicado.

## 5.- Resultados y discusión

El estudio de los dispositivos, para cada uno de los sistemas de caracterización presentados, se describe a continuación.

### 5.1.- Retardo de fase de una lente

El retardo de fase de cada lente se ha medido en función de la posición respecto del centro de la lente y de la amplitud de la tensión aplicada. En la Fig. 6 se muestran las capturas de los patrones de interferencia tomados por la CCD para los valores más representativos de tensión en valor eficaz. La anchura de cada imagen se corresponde con el diámetro de cada lente del array.

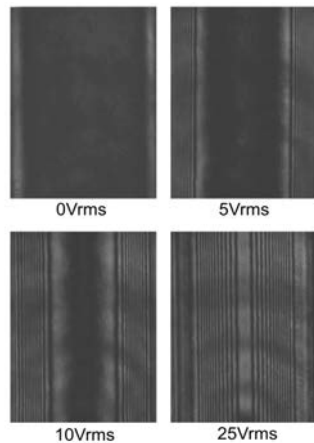


Fig. 6: Capturas de los patrones de interferencia de una lente en función de la tensión eficaz aplicada al electrodo de control.

En la Fig. 7 se representan los perfiles de retardo de fase extraídos a partir de las imágenes anteriores.

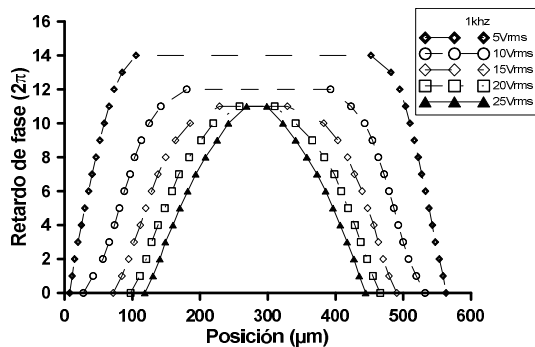


Fig. 7: Perfiles de retardo de fase para una lente en función de la posición y de la amplitud de la tensión aplicada.

Para tensiones pequeñas en el electrodo de control, por encima de la tensión umbral de conmutación del CL nemático, por ejemplo 5 V<sub>rms</sub>, se observa que la tensión transmitida al centro de la lente es inferior a la tensión umbral y por tanto insuficiente para excitar el CL. A medida que se incrementa la tensión en el electrodo de control, las franjas de interferencia avanzan hacia el centro de la lente (Fig. 6) generando el perfil parabólico propio de las lentes convencionales, en la línea del diseño propuesto. En este caso, el divisor de tensión sugerido entre la línea de transmisión (electrodo de alta resistividad) y la impedancia del CL conectada a tierra reproduce un reparto uniforme de tensión. Unido a este resultado, sin embargo, aparecen en el perfil del retardo dos efectos contrarios al diseño: un estrechamiento en la anchura efectiva de

la lente y una limitación en el valor máximo del retardo respecto al obtenido a bajas tensiones (14·2 ) (Fig. 7). El estrechamiento de la lente (disminución de su diámetro) puede indicar la saturación de la inclinación de las moléculas en las zonas próximas a los bordes.

## 5.2.- Caracterización angular de la lenticula

La distribución angular de la luminancia a través de la lenticula se muestra en la Fig. 8. En todos los casos, el motivo de la pantalla de iluminación tras cada lente de la lenticula consiste en una columna de píxeles encendidos junto a otra columna de píxeles apagados.

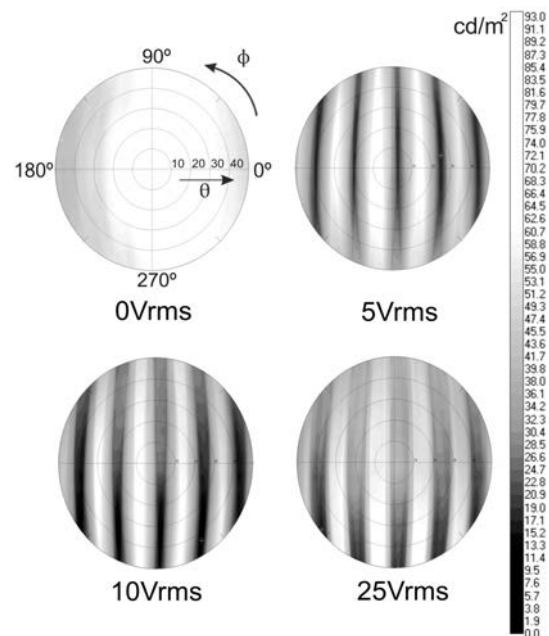


Fig. 8: Distribución angular de la luminancia en función de la tensión del electrodo de control.

Para 0 V<sub>rms</sub>, el CL dentro del array permanece en reposo sin formar el efecto de lente y, por tanto, la distribución de la luz no sufre ninguna desviación presentando un diagrama uniforme. Para 5 V<sub>rms</sub>, se ha superado la tensión umbral de conmutación y aparece el efecto de la lente diseñada. Es decir, la luminancia presenta, para el ángulo de inclinación ( ), varios conjuntos de zonas oscuras/claras correspondientes a la distribución angular de la luz emitida por la columna de píxeles encendidos. La definición de la luminancia no es demasiado buena para cada zona existiendo zonas de paso directo de la luz. Para 10

$V_{rms}$ , la definición de zonas aumenta. Para  $25 V_{rms}$ , se estrechan las lentes dejando, de nuevo, en los bordes de las mismas, zonas de paso directo de la luz de la pantalla sin la desviación apropiada y con los consiguientes aclarados en el diagrama en el centro de las zonas negras. Para el caso más favorable,  $10 V_{rms}$ , se ha estimado la calidad de la respuesta de la lenticula, si se empleara para una aplicación de visión estereoscópica, dando una medida de *crosstalk*. La medida de *crosstalk* se refiere a la relación entre la luminancia debida a una columna de píxeles encendidos de la pantalla (patrón blanco) y la debida a una columna de píxeles apagados de la pantalla (patrón negro). Por tanto, se han presentando de forma secuencial dos patrones en la pantalla, negro – blanco y blanco – negro y se han obtenido las luminancias representadas simultáneamente en la Fig. 9.

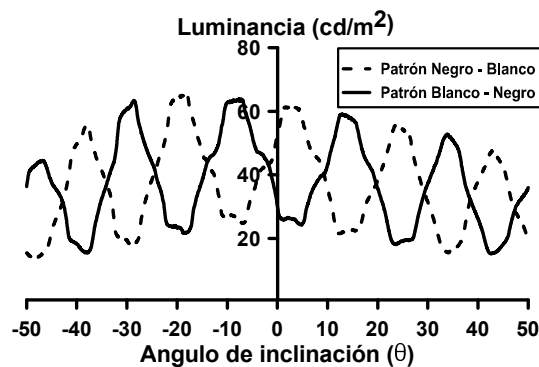


Fig. 9: Distribución angular de la luminancia para la medida de la interferencia.

Para una determinada inclinación ( $\theta$ ), la luminancia debería proceder únicamente de las columnas de píxeles encendidos tras la mitad de la lente. Por ejemplo, para  $\theta = 5^\circ$ ,  $60 \text{ cd/m}^2$  para el patrón negro – blanco. Sin embargo, existe una luminancia residual procedente de la otra mitad de la lente (patrón blanco - negro) de  $25 \text{ cd/m}^2$ . El *crosstalk* medido es del 41% viable para aplicaciones similares a las lenticulas fijas que muestran dos imágenes en función de la posición.

## 6.- Conclusión

Se ha propuesto la fabricación de una lenticula con tecnología de cristal líquido generando un perfil de retardo de fase a través de un electrodo de alta resistividad basado en una película metálica. Los dispositivos re-

producen un perfil del retardo de fase aproximadamente parabólico en el mejor caso. Así mismo, la distribución angular de la luminancia revela el perfil de desviación de dos imágenes con posibles aplicaciones similares a las lenticulas fijas.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos TEC2009-13991-C02-01 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y S2009/ESP-1781 financiado por la Comunidad de Madrid.

## Referencias

- [1] Brett E. BAGWELL, David V. WICK, Robert BATCHKO, Justin D. MANSELL, Ty MARTINEZ, Sergio R. RESTAINO, Don M. PAYNE, Jamie HARRIMANF, Steve SERATIF, Gary SHARPG, Jim SCHWIEGERLIN, "Liquid crystal based active optics", Proceedings of SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers), 2006.
- [2] Hongwen REN, Shin-Tson WUA, "Tunable electronic lens using a gradient polymer network liquid crystal", Appl. Phys. Lett., 82, 1, 22-24, 2002.
- [3] Mao YE, Bin WANG, Susumo SATO, "Effects of Dielectric Constant of Glass Substrates on Properties of Liquid Crystal Lens", IEEE Photon. Tech. Lett., 19, 17, 1295-1297, 2007.
- [4] Yun-Hsing FAN, Hongwen REN, "Liquid Crystal Microlens Arrays With Switchable Positive and Negative Focal Lengths", J. Display Technol., 1, 1, 151-156, 2005.
- [5] Gordon D. LOVE, Alexander F. NAUMOV, Michael LOKTEV, Igor R. GURALNIK, Gleb V. VDOVIN, "Liquid-crystal adaptive lenses with modal control", Opt. Lett., 23, 13, 992-994, 1998.
- [6] S. P. KOTOVA, O. A. ZAYAKIN, V. V. PATLAN, S. A. SAMAGIN, "Wavefront Formation Using Modal Liquid-Crystal Correctors", Phys. Wave Phenom., 18, 2, 96-104, 2010.
- [7] Andrés I. OLIVA ARIAS, "Nuevas propiedades físicas de materiales nanoestructurados", Ingeniería Revista Académica, 9, 3, 39-46, 2005.